高速気流による表面付着微粒子の除去効率に及ぼす湿度の影響[†]

後藤邦彰・武部彰二・増田弘昭

京都大学工学部 化学工学教室^{††}

馬場美二

オムロン(株)^{†††}

壁面に付着した微粒子の高速気流（エアージェット）による除去操作について、壁面への粒子付着時および除去操作時の湿度に着目し、粒子除去操作時の環境条件の一つである湿度が除去効率に与える影響を検討した。その結果、低湿度で付着した粒子は乾燥時間が長くなるに従い除去率が低下し、高湿度で付着した粒子では、ある乾燥時間で除去率が最大に達した後、低下することがわかった。また、乾燥時間が80時間以上になると付着時湿度の影響はなくなった。除去時湿度を変えて実験を行ったところ、低湿度では除去率は低く、約67%で最大となり、それ以上の高湿度では除去率は低くなった。このような除去率の変化は、吸着水分子によるHamaker定数の変化と液膜の厚さによる表面張力の変化を考慮にいれれば説明できることがわかった。

緒 言

1. 実験装置および方法

電気・電子産業をはじめとして多くの分野において、微粒子による製品の汚染が問題となる。現在までは、主に湿式洗浄により製品に付着した微粒子の除去が行われている。しかし、湿式法では一般に、濡れに弱い製品には使用できない、乾燥工程が必要となる、洗浄液が環境等の汚染の原因となるといった問題がある。そこで、筆者らは、乾式で、しかも除去装置の構造が比較的簡単な高速気流（エアージェット）による粒子除去法を取り上げ、ジェット噴射時間、噴射角度、ノズル-壁面間距離等の気流操作条件が除去効率に与える影響を実験的に検討した⁶⁾。また、噴射時間の短いジェットを連続的に噴射して、噴射回数による除去率の変化についても検討を行った。このジェットを連続的に噴射するパルスジェットを用いた除去については、大谷ら⁹⁾も報告している。

本研究では、壁面への粒子付着時および除去操作時の湿度に着目し、粒子除去操作時の環境条件の一つである湿度が除去効率に与える影響を検討した。

Fig. 1 に除去実験装置の概略図を示す。除去実験は前報⁶⁾と同様、コンプレッサーで圧縮した空気を、ミスト除去後減圧弁で所定圧力に調整し、ジェットノズルより高速で除去対象面に噴射して粒子の除去を行う。ジェットノズルは、Fig. 2 に示した噴射口面積 $0.25 \times 10 \text{ mm}^2$ の2次元スリット状ノズルを用いた。ジェット噴射条件は、ノズル内圧力（ゲージ圧） ΔP_n を 10^5 Pa 、噴射角度 θ を 45° 、ノズル先端と除去対称面との距離 d を 10 mm で一定とした。また、ノズル内圧力 ΔP_n が 10^5 Pa の時には、ジェット噴射時間 t が 10 秒で除去率は最高値に達して一定値になる⁶⁾ ので、ここでは $t = 10 \text{ sec}$ で一定とした。除去操作時の室内は空調機により温度をほぼ一定に保ち（約 20°C ）、主に超音波加湿器（松下電器産業㈱製、FE-05 KVE）により空気中の水分量を変えて除去時の相対湿度 ϕ_r を調節した。

実験では粒子を試料片（壁面）に付着させた後（除去前）、およびジェット噴射後（除去後）の粒子数をそれぞれ顕微鏡により計数し、それらの差を除去前の全粒子数で割って除去率を求めた。なお、除去率は気流衝突点近傍の3点（前報⁶⁾での測定点1, 2, 3）で測定し、その平均値を除去率 η とした。また、粒子数計数時の測定面積は、すべて $1 \times 1 \text{ mm}^2$ とした。

おもな実験条件を Table 1 に示す。試料粒子には粒子

[†] 1993年7月15日受理；粉体工学会春期研究発表会（京都、1992年5月）にて一部発表

^{††} 〒606-01 京都市左京区吉田本町

^{†††} 〒525 草津市西草津2-2-1

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2 Air jet nozzle

径 $3.7\mu\text{m}$ のラテックス標準粒子(Stylene/Divinylbenzene)を用い、試料片にはガラス(ほう硅酸ガラス)を用いた。

Fig. 3は試料片へ粒子を付着させる装置である。ラテックス標準粒子は界面活性剤を含有した液中に分散させた状態で保存されているので、ネブライザーで噴霧してエアロゾル化した後、バッファー容器で粒子を加熱し乾燥させた。気流中の水分はシリカゲルを充填した拡散乾燥器で除去し、インパクターを用いて慣性衝突により粒子を壁面に付着させた。インパクターはジェット径9mmで、気流流速は約 6m/s で一定とした。付着操作時にデジタル温湿度計を用いてインパクター内衝突板下流での気体湿度を測定し、これを粒子付着時湿度 ψ_d とした。この付着時湿度はバッファー容器での加熱温度および拡散乾燥器の長さを変えることにより変化させた。除去時湿度 ψ_r の影響を検討する時には、付着条件はバッファー容器の壁面温度約 60°C 、拡散乾燥器長さ66cm(気流平均滞留時間約0.23秒)で一定とした。一般に、慣性衝突により壁面に付着した粒子の個数は、気流の衝突点を中心に半径方向に分布を持つが、本実験での測定点である気流衝突点近傍では粒子数に顕著な差は見られず、ほぼ均一な付着状態を確認した。また、付着粒子数は、1つの測定面内で約200個となるよう、粒子付着時間を調節した。

粒子付着後、光学顕微鏡を用いて各測定面での粒子数

Table 1 Experimental conditions

Wall	Glass	
Particle	Stylene/divinylbenzene	
Particle size	D_p	$3.7\mu\text{m}$
Nozzle pressure	ΔP_n	10 Pa
Jet impinging angle	θ	45 deg
Jet-wall distance	d	10 mm
Jet duration time	t	10 s
Relative humidity (deposition)	ψ_d	52~74 %
Relative humidity (removal)	ψ_r	55~82 %
Drying time in desiccator	t_d	1~180 hr

Fig. 3 Apparatus for preparing a particle deposited test piece

を計数し、デシケータ内で乾燥させた。試料片をデシケータ内に入れるために蓋の開閉を行った後、デシケータ内が定常的な湿度(約15%)に達するまでには約15分を要する。このため、乾燥時間は一定湿度中での乾燥と見なせるように最低1時間とした。

2. 実験結果および考察

Fig. 4に、付着時の湿度をパラメータとして、デシケータ内での乾燥時間を変えて除去実験を行った結果を示す。各実験での付着時の湿度は $\pm 1.5\%$ 以内の精度で調節した。また、除去時の湿度 ψ_r は59%で一定とした。付着時の湿度が最も低い $\psi_d = 55\%$ では、乾燥時間が長くなるに従い除去率は低下し、5時間を越えると約10%で一定値となる。 $\psi_d = 58\%$ では、乾燥時間20時間近傍までは除去率の低下は小さく、70~80%の高い除去率が得られ、乾燥時間が20時間を越えると急激に低下をはじめる。60時間を越えると $\psi_d = 55\%$ での値と等しく、一定値となる。 $\psi_d = 64, 72\%$ では、それぞれ3時間、6時間近傍までは乾燥時間が長くなるに従い除去率は高くなるが、その後、急激に低下する。すなわち、(1)除去時湿度 ψ_r 以下の湿度で付着させた場合には乾燥時間が長くなるにつれて除

Fig. 4 Effect of drying time on the removal efficiency

去率は減少し、(2) 除去時湿度以上で付着させたときにははじめ除去率は向上し、ある乾燥時間で最高値となった後低下をはじめ。また、(3) 乾燥時間が80時間を越えると付着時の湿度 ψ_d は除去効率に影響しなくなることがわかる。これらの結果から、常温(25°C)で湿度60%前後の通常の雰囲気中で除去を行う時には、比較的低湿度の雰囲気中で付着した粒子は付着後直ちに除去した方が除去効率は良く、高湿度で付着した粒子はある程度乾燥した方が除去効果は高くなるといえる。

除去時の湿度 ψ_r を変えて除去実験を行った結果を Fig. 5 に示す。ここでは、付着時の湿度の影響がでないように、Fig. 4 の結果に従って粒子付着後テストピースをデシケータ内で100時間以上乾燥させた。乾燥後、調整した除去環境中に移し2分以上放置した後、除去実験を行った。除去率は低湿度では低く、湿度が増加するにつれて急激に増加する。除去時湿度 ψ_r が約67%で除去率は最大となり、それ以上の湿度では低下する。この図から、除去操作の環境条件である除去時湿度 ψ_r を調節することにより、粉体付着操作時の湿度にかかわらず除去率を向上できることがわかる。なお、この傾向は、本実験で用いたガラス片だけでなく高分子系および金属系の試料片においても見られた。これら試料片の材質を変えた実験結果は別報で報告する。また、乾燥後、除去環境にセットした後の放置時間を変えて実験を行ったが、放置時間が1分以上あれば除去率に影響しないことを確認した。すなわち、Fig. 5 の各実験結果は、除去環境中での平衡値であると考えられる。

湿度により除去率が変化する原因として、粒子-壁面間付着力に対して粒子および壁面上に存在する水分子の及ぼす影響が考えられる。湿度が低く、水分子の影響がない場合には van der Waals 力は真空中の値で近似でき、水の存在するときよりも大きな付着力となる。また、湿度が高くなり粒子-壁面間に液膜が形成されると、湿度の増加に伴い液架橋力が増加し、付着力が増加することが報告されている¹⁾。このことから、除去率は低湿度では主に van der Waals 力の増加により低下し、高湿度で

Fig. 5 Effect of relative humidity on the removal efficiency

Fig. 6 Model showing water adsorption

は液架橋力の増加により低下したと考えられる。低湿度では、一般に、粒子および壁表面は水分子が吸着した状態にあり、数分子層以下の吸着分子層を形成していると考えられる (Fig. 6-a)。試料壁面であるガラス表面上での水の吸着層厚さ δ の相対湿度による変化は近沢ら¹⁾により示されており、ここでは Halsey の式¹²⁾を変形した次式により近似する。

$$\ln \psi = -\frac{k}{RT\theta_w} \quad (1)$$

$$\theta_w = v/v_m$$

ここで、 $v = S\delta$ とおくと、

$$\ln \psi = -\frac{K_h}{\delta^r} \quad (2)$$

$$K_h = \frac{k v_m}{RTS} = 1.48 \times 10^{-17}$$

$$r = 1.81$$

係数およびべき指数の決定に用いた結果と近似曲線を Fig. 7 に示す。近似した曲線はプロット点とよく一致する。また、この図から本実験範囲内では最も低い湿度においても約0.5nm (約1.7分子)以上の水分子が吸着することがわかる。この状態では、吸着水分子層はバルクの水とは異なり粒子-壁面間付着力として液架橋力は働かない

Fig.7 Approximation of adsorption-layer thickness

が, van der Waals 力および静電気が働くと考えられる. ここでは van der Waals 力 F_v のみを考え, 静電気力は無視すると, 粒子-壁面間付着力 F_d は次式で与えられる³⁾.

$$F_d = F_v = \frac{AD_p}{12z_0^2} \left(1 + \frac{A^2 k_p^2 D_p}{108 z_0^2} \right) \quad (4)$$

$$k_p = \frac{1 - \nu_p^2}{E_p} + \frac{1 - \nu_w^2}{E_w} \quad (5)$$

$$z_0 = 4 \times 10^{-10}$$

$$E_w = 7.5 \times 10^{10} \text{ (ガラス)}^{7)}$$

$$E_p = 0.38 \times 10^{10} \text{ (ポリスチレン)}^{7)}$$

$$\nu_w = 0.17 \text{ (ガラス)}^{7)}$$

$$\nu_p = 0.34 \text{ (ポリスチレン)}^{7)}$$

水分の存在により Eq.(4) 中で主に Hamaker 定数 A が変化し, 乾燥した空気中と液中に対して, それぞれ次式で近似できる¹¹⁾.

$$A = \sqrt{A_p \cdot A_w} \quad (\text{空気中}) \quad (6)$$

$$A = (\sqrt{A_p} - \sqrt{A_l}) (\sqrt{A_w} - \sqrt{A_l}) \quad (\text{液中}) \quad (7)$$

しかし, 上式より水分による付着力の変化を考えると, 空気中の値から液中の値にステップ状に変化することになるので, 実験結果で見られたような湿度に対する連続的な除去率の変化を表すことができない. そこで, 粒子-壁面間の媒体 (水分子 + 空気) の Hamaker 定数が湿度によって連続的に変化する吸着水分子層に依存すると考える. 吸着層が存在する場合の Hamaker 定数は次式で与えられる¹⁰⁾.

$$A = (\sqrt{A_p} - \sqrt{A_l}) (\sqrt{A_w} - \sqrt{A_l}) \quad (8)$$

$$A_l = [K_a \sqrt{A_a} + (1 - K_a) \sqrt{A_m}]^2 \quad (9)$$

$$K_a = 2\delta K_{a0} / z_0 \quad (10)$$

ここで, A_a は吸着質の Hamaker 定数, A_m は媒体の Hamaker 定数を表す. 本実験では媒体は空気, 吸着質は水分子であるので, Eqs.(8), (9) は $K_a = 0$ の時 Eq.(6) と等しくなり, $K_a = 1$ の時 Eq.(7) と等しくなる. すなわち, $A_m = 0$ である. よって, 粒子-壁面間の Hamaker 定数は次式で表される.

$$A = (\sqrt{A_p} - K_a \sqrt{A_l}) (\sqrt{A_w} - K_a \sqrt{A_l}) \quad (11)$$

Eq.(10) 中の K_{a0} は 2 物体間での吸着質と媒質の体積割合を, $2\delta/z_0$ は吸着層厚さと 2 物体間表面距離の比をそれぞれ表す. 吸着水分子が存在しない場合には $K_{a0} = 0$ で, $K_a = 0$ である. 水分子が存在する場合に吸着水分子がバルクの水と同じと考えると $K_{a0} = 1$ で一定となる. z_0 を $4\text{\AA}$ とすると本実験範囲内 ($\delta \geq 5\text{\AA}$) では $2\delta/z_0$ は 1 以上となり, K_a は 1 以上となる. そこで, K_a は吸着水分子層厚さ δ に依存するとし, δ の一次関数で与える. 水分子層厚さ $\delta = 0$ の時 $K_a = 0$ とし, 吸着水膜が液体的物性を具備し毛管凝縮が可能となる時の液膜の厚みは $2.9 \sim 3.7\text{ nm}$ とされている²⁾ ので, 粒子-壁間の液膜厚さ $2 \times \delta$ が 3.5 nm のとき $K_a = 1$ とし, 次式で与えた.

$$K_a = (1.75 \times 10^{-9})^{-1} \delta \quad (12)$$

$$0 \leq K_a \leq 1$$

試料粒子表面への吸着水分子層厚さも Eq.(3) で与えられるとすると, Eqs.(3)~(6), (9)~(12) を用いて, 湿度 ϕ_r による付着力 F_d の変化を計算することができる. 除去実験結果は除去率で表されているので, 計算された付着力 F_d を基に除去率の計算値 η_{cal} を求める. Fig. 8 に示すように, 前述の付着力 F_d をその平均値として粒子-壁面間の付着力に分布を与える. なお, 付着力分布 f_{ad} は次式のように対数正規分布を仮定した.

$$f_{ad} = \frac{1}{\ln \sigma_g \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(\ln F - \ln F_d)^2}{2 \ln^2 \sigma_g} \right\} \quad (13)$$

いま, 除去力を F_r とすると, 除去率 η_{cal} は付着力分布より次式で計算できる.

$$\eta_{cal} = \int_0^{F_r} f_{ad} dF \quad (14)$$

Eqs.(13), (14) より, 湿度による付着力 F_d の変化から除去率の変化を計算することができる. $\ln \sigma_g$ をパラメータとして湿度による除去率の変化を計算した結果を Fig. 9 に示す. ここで, F_r は, 液架橋が形成されないと考えられる湿度 $\phi_r = 60\%$ の実験結果より $\eta_{cal} = 12\%$ となるように各 $\ln \sigma_g$ について決定した. また, 計算には以下の Hamaker 定数を用いた.

$$A_w = 1.6 \times 10^{-19} \text{ (ガラス : SiO}_2\text{)}^{10)}$$

$$A_p = 1.2 \times 10^{-19} \text{ (ポリスチレン)}^{10)}$$

$$A_l = 4.8 \times 10^{-20} \text{ (水)}^{10)}$$

湿度 ϕ_r が 67% 以下の範囲では, $\ln \sigma_g = 0.2$ として計算した結果と実験結果はほぼ一致する. これより, 低湿度での除去率の変化は, 吸着水分による Hamaker 定数の変化で説明ができることがわかる. しかし, 計算結果は湿度 ϕ_r が 67% 以上でも右上がりの曲線となり, 実験結果の最大値を持つ傾向とは一致しない. これは, 高湿度において形成される液膜による液架橋力を考慮していないためであると考えられる.

Fig. 8 Schematic diagram showing the change of calculated removal efficiency depending on adhesive force

粒子と壁の接触点近傍では、飽和蒸気圧以下であっても湿度がある程度高ければケルビン効果により水分が凝縮し、液膜を形成することが知られている。この液膜により、粒子-壁面間には液架橋力が働くと考えられる。本実験では粒子、試料片表面上の不純物(界面活性剤等)や粒子付着・除去操作環境での空气中不純物を除去していないので、凝縮液中には溶解性不純物が含まれると考えられる。そこで、ケルビン式は、向阪ら^{4,5)}により等径2球間の液架橋に対して示された式(Appendix 参照)を用いた。この式は等径の2球間に対して導出されているので、 r_0 を次式で定義する換算粒径 d_e を用いて、球-平板間($d_1=D_p$, $d_2=\infty$)に変換した。

$$d_e = \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} = r_0 \quad (15)$$

向阪らの式およびEq. (15)を用いると、除去時湿度 ψ_r の時の液膜半径 r_1 および液橋半径 r_2 が求められる。前述のように液膜厚さが2.9~3.7nmで架橋が形成されることから、液膜厚さ $2 \times (\delta + r_1)$ が3.5nm以上となる湿度で液架橋が形成されると仮定した。これらの値から、次式で表されるLaplace-Youngの式⁸⁾を用いて液架橋力 F_w を求めた。

$$F_w = 2\pi r_2 \tau + \pi r_2^2 \tau \left\{ (1/r_1) - (1/r_2) \right\} \quad (16)$$

粒子-壁面間付着力 F_d は、液架橋力 F_w とvan der Waals力 F_v の和として、次式で与えられる。

$$F_d = F_w + F_v \quad (17)$$

先と同様、Eq. (17)で与えられる付着力を付着力の平均値として付着力分布を仮定し、不純物の分子数 N_s をパラメータとして除去率を計算した結果をFig. 10に示す。計算では、 $\ln \sigma_g$ はFig. 9で低湿度での実験結果とよく一致した0.2とし、除去力 F_r はFig. 9と同じ値(1.1×10^{-6})を用いた。Eq. (16)を基にして計算した結果は図中の破線で表した。液膜が形成される湿度までは、Fig. 9と同様、除去率は増加するが、液膜を形成すると除去率は計算で

Fig. 9 Calculated removal efficiency as a function of relative humidity (van der Waals)

Fig. 10 Calculated removal efficiency as a function of relative humidity (van der Waals + liquid bridge)

はほぼ0となり、実験結果とは全く異なる。これは、厚みが薄いときには液架橋の表面張力 τ はバルクの水の値よりも小さいことを考慮していないためであると考えられる。多孔質ガラスを用いた実験結果²⁾より、液膜厚さによる表面張力の変化を次式で近似する。

$$\frac{\tau}{\tau_0} = 0.17 \times (\delta + r_1) + 0.32 \quad (18)$$

$$\tau_0 = 7.3 \times 10^{-2}$$

上式をEq. (16)に代入し、除去率を計算した結果がFig. 10中の実線である。計算結果は、不純物の分子数 $N_s = 0.0035 [\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}]$ とすると、高湿度での除去率は計算値の方が10%程度高いが除去率の変化傾向は良く一致し、除去率が最大となる湿度もほぼ一致する。この図から、高湿度での除去率の減少は液架橋の形成による付着力の増加が原因であり、その変化は液膜厚さによって表面張力が線形に変化すると仮定すれば説明できることがわかる。また、Fig. 9に示したvan der Waals力の影響と併せて考えると、除去率が最大値を持つのは吸着水分によるvan der Waals力の低下と液架橋の表面張力がバルクの水のそれより小さいことによると考えられる。不純物

の分子数 N_s を変えて計算を行った結果から、不純物量が低いほど液膜が形成される湿度は高く、除去率が最大となる湿度は高くなる。このことから、除去前および除去時での粒子、壁表面上の不純物量を減らせば、より高い湿度まで液膜は形成されず、van der Waals 力の低下により Fig. 9 に示したような高い除去率が得られることが予想される。

粒子の付着時および乾燥時にもここで示した吸着水分量による van der Waals 力の変化と液架橋力の変化が影響すると考えると、Fig. 4 に示した乾燥時間による除去率の変化も定性的に説明ができる。すなわち、高湿度で粒子が付着した時には液架橋力と van der Waals 力が付着力として働くと考えられる。乾燥に伴い液膜は小さくなり、液架橋力が小さくなるために付着力が減少し、除去率は高くなる。さらに乾燥すると液膜は消失し吸着水分子の状態となり、水分子が減少するにつれ van der Waals 力が液中の値から空気中の値に近づくため、付着力は増加し除去率は低くなると考えられる。低湿度で付着した時には、付着時から水分子は液膜を形成せず van der Waals 力が支配的であるので、乾燥に伴い付着力が増加し除去率は低下すると考えられる。

結 言

壁面への粒子付着時の湿度および除去操作時の湿度に着目し、高速気流による粒子除去効率に及ぼす湿度の影響を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

1) 低湿度で付着した粒子は、乾燥時間が長くなるに従い、除去率が低下する。高湿度で付着した粒子では、ある乾燥時間で除去率が最大に達した後、低下する。乾燥時間が80時間以上になると付着時湿度の影響は見られなくなる。

2) 除去操作時の湿度を変えて実験を行ったところ、低湿度では除去率は低く、約67%で最大となり、それ以上の高湿度では除去率は低くなることがわかった。

3) 低湿度での除去率の変化は、吸着水分子による Hamaker 定数の変化を考慮することにより説明ができる。また、高湿度での変化は液膜の厚さによる表面張力の変化を考慮にいれれば、液架橋力の式で説明できることがわかった。従って、上記1), 2) は一般性のある結果と言える。

Appendix

ケルビン効果を表す式には、以下に示す向阪ら^{4,5)}により等径2球間の液架橋に対して示された式を用いた。

$$\psi_r = (1 - r_s) \exp \left(- \frac{M_w \sigma}{RT \rho_l} \cdot \frac{ds}{dv_w} \right) \quad (\text{A-1})$$

$$r_s = \frac{i M_w}{\rho_w} / \left(\frac{3 v_w}{4 \pi N_s r_0^3} - \frac{M_s}{\rho_s} + \frac{i M_w}{\rho_w} \right) \quad (\text{A-2})$$

$$0 \leq r \leq 1$$

$$v = 2 \pi r_0^3 R_1^2 \{ (1 + H/2 - A_s \sqrt{(1 + R_1)^2 - (1 + H/2)^2} - H^2 (H + 6) / (24 R_1^2) \} \quad (\text{A-3})$$

$$\frac{ds}{dv} = \frac{2}{r_0} \times \frac{(2 R_1^2 + 3 R_1 - H^2 / 4 - H) A_s}{- R_1 (3 R_1^2 + 5 R_1 - H^2 / 2 - 2 H) A_s} \cdot \frac{- \sqrt{(1 + R_1)^2 - (1 + H/2)^2}}{+ \sqrt{(1 + R_1)^2 - (1 + H/2)^2}} \times \frac{R_1 (2 R_1 + 3) (1 + H/2) / (R_1 + 1)^2}{\times R_1 (2 + 3 R_1) (1 + H/2) / (R_1 + 1)} \quad (\text{A-4})$$

$$A_s = \sin^{-1} \{ (1 + H/2) / (1 + R_1) \} \quad (\text{A-5})$$

Eq. (A-2) 中で、不純物濃度は薄いとして $M_s / \rho_s = 0$ とした。また、 i は溶質（不純物）の種類、濃度により異なるが、ここでは 2^{41} とした。 R_1 は次式で定義される無次元液膜半径である。

$$R_1 = r_1 / r_0 \quad (\text{A-6})$$

r_1 は Fig. 6 に示した凝縮液膜半径を表す。凝縮液膜を粒子および壁面に接する円弧で近似すると、半径 r_1 , r_2 の間には次式が成立する。

$$\frac{r_2}{r_0} = \sqrt{(1 + r_1)^2 - (1 + H/2)^2} - R_1 \quad (\text{A-7})$$

以上の式により、除去時湿度 ψ_r において形成される凝縮液膜半径 r_1 および液膜半径 r_2 を計算した。

[謝 辞] 本研究において多大なるご協力と貴重なご意見を頂きましたオムロン株式会社石近忠郎氏、伊藤貞則氏、西村定氏に謝意を表します。

Nomenclature

A	= Hamaker constant between particle and wall	[J]
A_s	= Hamaker constant of adsorbate	[J]
A_i	= Hamaker constant of interface with adsorbed layer	[J]
A_l	= Hamaker constant of water	[J]
A_m	= Hamaker constant of media	[J]
A_p	= Hamaker constant of particle	[J]
A_w	= Hamaker constant of wall	[J]
D_p	= particle diameter	[m]
d	= jet-wall distance	[m]
d_1, d_2	= diameter	[m]
d_e	= equivalent diameter	[m]
E_p	= Young's modulus of particle	[N·m ⁻²]
E_w	= Young's modulus of wall	[N·m ⁻²]
F	= adhesive force between particle and wall	[N]
F_d	= average adhesive force	[N]
F_r	= removal force	[N]
F_v	= van der Waals force	[N]
F_w	= liquid bridgeing force	[N]

f_{ad} = frequency of adhesive force	[-]	η_{cal} = calculated removal efficiency	[-]
H = nondimensional gap ($=z_0/r_0$)	[-]	θ = jet impinging angle	[deg]
i = von't Hoff factor	[-]	ν_p = Poisson's ratio of particle	[-]
K_s = coefficient in Eq.(9)	[-]	ν_w = Poisson's ratio of wall	[-]
K_{ad} = coefficient in Eq.(10)	[-]	ρ_l = density of liquid bridge	[kg·m ⁻³]
K_h = coefficient in Eq.(3)	[m]	ρ_w = density of water	[kg·m ⁻³]
K_p = coefficient defined by Eq.(5)	[m ² ·N ⁻¹]	σ_g = geometric standard deviation	[-]
k = coefficient in Eq.(2)	[J·mol ⁻¹]	ψ = relative humidity	[-]
M_s = molecular weight of solute	[kg·mol ⁻¹]	ψ_d = relative humidity at deposition equipment	[-]
M_w = molecular weight of water	[kg·mol ⁻¹]	ψ_r = relative humidity at removal equipment	[-]
N_s = number of solute molecules divided by single particle volume	[mol·m ⁻³]		
ΔP_n = air pressure at nozzle	[Pa]		
R = gas constant	[J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹]		
R_1 = nondimensional radius of liquid bridge	[-]		
r = exponent in Eq.(2)	[-]		
r_0 = radius of equivalent diameter	[m]		
r_1 = radius of liquid bridge	[m]		
S = surface area	[m ²]		
s = surface area of liquid bridge	[m ²]		
T = temperature	[K]		
t = duration time of air jet	[s]		
t_d = drying time	[hr]		
v = adsorbed molecular volume	[m ³]		
v_w = volume of liquid bridge	[m ³]		
v_m = monolayer adsorption capacity	[m ³]		
z_0 = gap between particle and wall	[m]		
τ = surface tension of liquid bridge	[N·m ⁻¹]		
τ_0 = surface tension of water	[N·m ⁻¹]		
τ_s = dimensionless parameter defined by Eq.(A-2)	[-]		
δ = thickness of adsorption layer	[m]		
γ = removal efficiency	[-]		

Literature cited

- 1) Chikazawa, M., W. Nakajima and T. Kanazawa: *J. Res. Assoc. Powder Technol.*, **14**, 18-25 (1977)
- 2) Chikazawa, M., T. Yamaguchi and T. Kanazawa: *Proc. Int. Symp. Powder Technol.* '81, p.p.202-207 (1981)
- 3) Dahneke, B.: *J. Colloid and Interface Sci.*, **40**, 1-13 (1972)
- 4) Endo, Y., Y. Kousaka and Y. Nishie: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **18**, 950-955 (1992)
- 5) Kousaka, Y., Y. Endo and Y. Nishie: *ibid.*, **18**, 942-949 (1992)
- 6) Masuda, H., K. Gotoh, H. Fukada and Y. Banba: *J. Soc. Powder Technol.*, **30**, 24-31 (1993)
- 7) Nihon Kagaku Kai: "Kagaku Binran", p.564, Maruzen (1975)
- 8) Okuyama, K., H. Masuda and S. Morooka: "BIR-YUSI KOGAKU", p.40, Ohm-sha (1992)
- 9) Otani, Y., H.Emi and T.Morizane: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **19**, 114-119 (1993)
- 10) Vincent, B.: *J. Colloid and Interface Sci.*, **42**, 270-285 (1973)
- 11) Visser, J.: *Advan. Colloid Interface Sci.*, **3**, 331-363 (1972)
- 12) Young, D.M. and A.D. Crowell: "PHYSICAL ADSORPTION of GASES (Trans. by T. Takaishi and S. Furuyama)", p.156, Sangyo-Co. (1969)

The Effect of Humidity on the Removal of Fine Particles on a Solid Surface Using a High-Speed Air-Jet

Kuniaki Gotoh, Syoji Takebe and Hiroaki Masuda

Dept. of Chem. Eng., Kyoto Univ., Kyoto 606-01

Yoshiji Banba

OMRON CO., Kusatsu 525

Key Words : Removal Efficiency, Surface Cleaning, Effect of Humidity, Deposited Particles, Fine Particles, High-Speed Air Jet

The effect of operating conditions on the removal efficiency of deposited particles using a high-speed air jet was studied with particular attention to the humidity of air surrounding at particle deposition and the air-jet removal. The experimental results showed that the removal efficiency of particles deposited in a low-humidity atmosphere decreased with increasing drying time after the deposition. In the case of deposition under high humidity, the removal efficiency increased at the beginning of drying and decreased rapidly after achieving maximum efficiency. For drying over 80 hrs, however, the humidity of surrounding air at the particle deposition did not affect the removal efficiency.

The efficiency also depended on the humidity at the air-jet removal, and achieved maximum value at 67 % relative humidity. Such a variation in removal efficiency has been well explained by the change of Hamaker's constant with the adsorbed layer-thickness of water molecules and the variation of liquid surface tension with the thickness of liquid bridge.